

Design and Fabrication of Digital 3-axis Magnetometer for Magnetic Signal from Warship

Eunae Kim and Derac Son*

Dept. of Photonics and Sensors, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

(Received 26 July 2014, Received in final form 18 August 2014, Accepted 18 August 2014)

We developed a digital 3-axis flux-gate magnetometer for magnetic field signal measurement from warship during demagnetizing and degaussing processes. For the magnetometer design, we considered following points; the distance between magnetic field measurement station and magnetometer located under sea is about several 100 m, the magnetometer is exposed to magnetic field of ± 1 mT during demagnetizing process, and magnetometer is located under the sea about 30 m depth. To overcome long distance problem, magnetometer could be operated on wide input supply voltage range of 16~36 V using DC/DC converter, and for the data communication between the magnetometer and measurement station a RS422 serial interface was employed. To improve perming effect due to the ± 1 mT during demagnetizing process, magnetometer could be compensated external magnetic field up to ± 1 mT but magnetic field measuring rang is only ± 100 μ T. The perming effect was about ± 2 nT under ± 1 mT external magnetic field. The magnetometer was tested water vessel with air pressure up to 6 bar for the sea water pressure problems. Linearity of the magnetometer was better than 0.01 % in the measuring range of ± 0.1 mT and noise level was 30 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz.

Keywords : Magnetometer, flux-gate magnetometer, low magnetic field, perming, amorphous core

함정 자기신호 측정용 3축 디지털 자기센서 설계 및 제작에 관한 연구

김은애 · 손대락*

한남대학교 광센서공학과, 대전시 대덕구 한남로 70번지, 306-791

(2014년 7월 26일 받음, 2014년 8월 18일 최종수정본 받음, 2014년 8월 18일 게재확정)

본 연구에서는 함정을 자기소거시키는 과정에서 함정에 의한 자기장을 측정하기 위한 3축의 flux-gate 마그네토미터를 설계·제작하였다. 설계에서 고려한 사항은 자기장 측정지점과 자기장 데이터를 수집하는 장치 사이의 거리가 수백미터로 멀기 때문에 입력전압의 변동이 커도 동작이 되게 전압 범위가 16~36 V까지 가능한 DC/DC 변환기를 사용하였고, 데이터의 전송은 자기장 측정값을 디지털로 변환 시킨 후 RS422통신으로 전송하게 하였다. 또한 함정을 자기소거 하는 과정에서 발생하는 ± 1 mT 자기장하에서도 0점의 변화가 ± 2 nT 이하가 되게 피측정자기장의 보상은 ± 1 mT, 측정범위는 ± 0.1 mT가 되게 제작을 하였다. 또한 수심 30 m에서도 동작되어야 하는 조건을 고려하여 6기압 하에서 센서가 수밀이 되고 정상 작동이 되는 것을 확인 하였다. 마그네토미터의 일반특성으로는 선형도가 측정범위 ± 0.1 mT에서 0.01 % 이상 이었고 센서의 노이즈는 1 Hz에서 30 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 이었다

주제어 : 마그네토미터, 플럭스게이트 마그네토미터, 저자기장, 퍼밍, 비정질 코어

I. 서 론

Flux-gate 마그네토미터는 1930년대를 전후로 개발된 저자기장 측정 센서 로[1-3], 군사용 및 인공위성 등에 널리 사용되고 있으며, 선박의 방위각 표시 및 비파괴검사 등에도 널리

사용되고 있다. Flux-gate 마그네토미터가 오늘날 까지 많이 사용되고 있는 이유는 여러 가지의 장점을 가지고 있기 때문이다. 예를 들면 소형이면서 장기적 안정성이 요구되는 분야나, 고 에너지 입자의 노출에도 내성을 가져야 되는 분야에 특히 중요하게 사용되고 있다.

본 연구에서는 함정의 자기 신호를 측정하는 3축의 flux-gate 마그네토미터 제작에 관한 연구를 하였다. 이를 위해서는 3가지의 문제점을 설계에 고려하였다. 첫 번째는 센서와

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-42-629-7512,

Fax: +82-42-629-8313, e-mail: deracson@hnu.kr

센서의 데이터를 수집하는 장치와의 거리가 수백 미터 이상 되기 때문에 센서의 입력전원의 변동이 커도 동작이 잘되어야 하고, 둘째는 센서 위치와 데이터를 수집하는 장치 사이의 거리가 또한 수백 미터 이상이어서 아날로그 신호의 전송이 불가능하기 때문에 디지털 데이터 통신을 하여야 되고, 세 번째는 함정을 자기소거시키는 환경에서도 flux-gate 마그네토 미터의 0점의 변화가 적어야 한다. 본 연구에서 제작된 flux-gate 마그네토미터는 perming 효과가 적게 하기 위하여 외부 자기장의 보상은 ± 1 mT까지 할 수 있게 하고 측정은 ± 0.1 mT까지 할 수 있으면서 디지털 데이터 통신이 가능한 flux-gate 마그네토미터를 설계 · 제작하였다.

II. Flux-gate 마그네토 미터의 설계 및 제작

본 연구에서 flux-gate 마그네토 미터의 원리는 피드백 형태로 제작하였다[4]. 코어는 Co계 비정질리본 Metglass®2714를 폭이 3 mm되게 슬리팅 한후 350 °C에서 1시간 열처리를 하여 사용하였으며, 코어를 자화시키는 일차코일은 직경이 0.2 mm인 에나멜 동선을 300회 권선하였으며 이차코일을 직경이 6 mm인 보빈에 직경이 0.12 mm인 에나멜동선을 500회 권선하였다. 또한 피측정 자기장을 ± 1 mT까지 보상을 하여야 되기 때문에 보상 코일은 따로 권선 하였으며 직경이 8 mm인 보빈에 직경이 0.12 mm인 에나멜 동선을 1200회 권선하였다.

마그네토미터의 전자회로는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 자화주파수 $f=12$ kHz, $2f=24$ kHz를 발생시키기 위하여 microcontroller 칩인 Attiny45를 사용하였으며, 자화전압파형은 주파수 f 신호를 연산증폭기를 사용 구형파로 만들어서 센

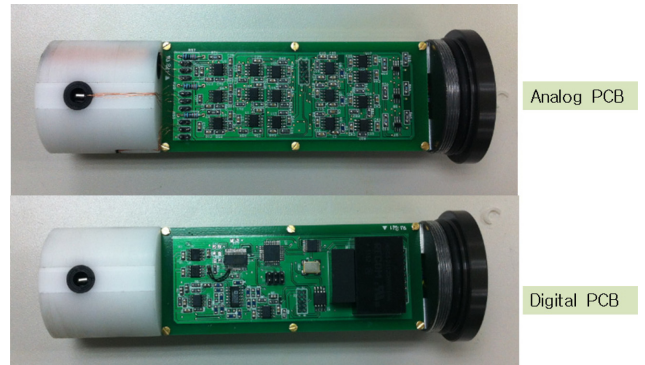


Fig. 2. (Color online) Photographs of the developed digital 3-axis flux-gate magnetometer.

서코어를 자화시켰다. 이차 코일에 유도되는 기전력은 demodulator로 CMOS 스위치를 사용 $2f$ 신호만을 검출 한 후, 차단 주파수가 10 Hz인 저주파수대역 필터를 사용하여 자화주파수 성분을 제거하였다. 또한 피 측정자기장을 보상하기 위한 feed-back은 PI제어방식을 사용하였고 그 출력을 보상코일에 입력시켰다. 보상코일에 흐르는 최대 전류는 피측정 자기장이 ± 1 mT까지 되게 하였으나, 자기장 측정범위는 ± 0.1 mT까지만 측정하면 되기 때문에 feedback 증폭기의 출력을 10배 증폭한 후 4개의 채널을 디지털로 변환 시킬 수 있는 24 bit의 $\sigma-\delta$ ADC(Analog Digital Converter)를 사용하였으며, microcontroller인 Atmega8을 사용 ADC를 조절하고 ADC의 값으로부터 센서의 offset 및 gain을 연산한 디지털 신호를 RS-422 통신으로 측정값을 출력할 수 있게 하였다. 또한 입력전압이 18~36 V 사이에서도 센서가 정상 작동될 수 있게 24 V 입력의 DC/DC 변환기를 사용하였다.

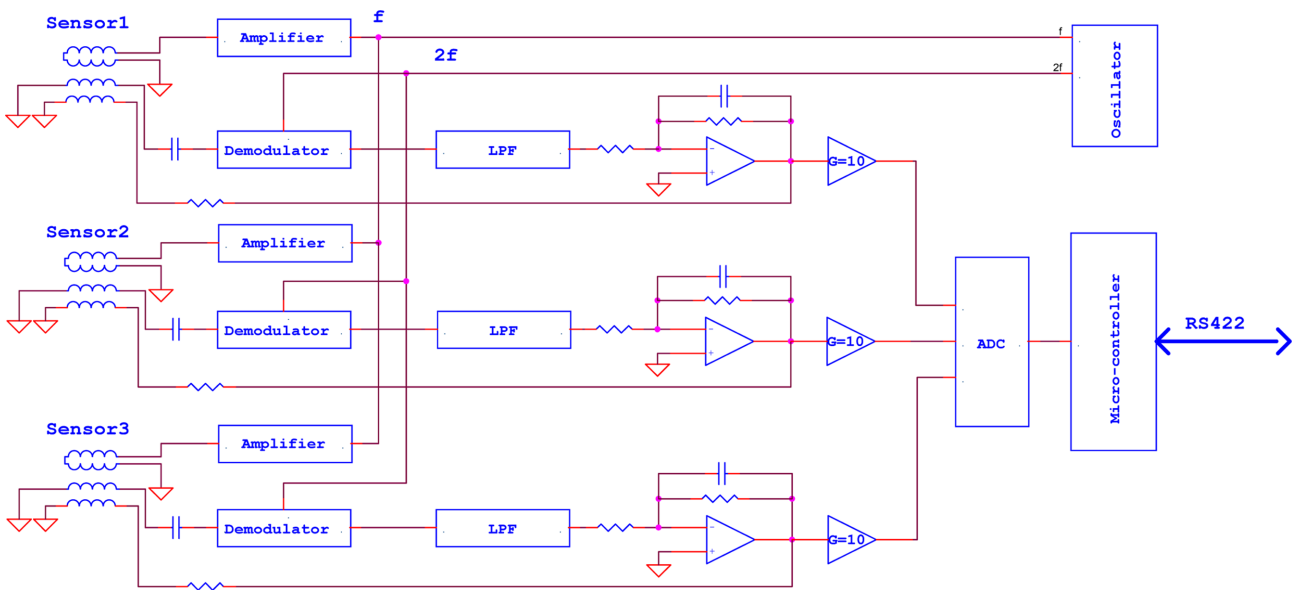


Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of the developed digital 3-axis flux-gate magnetometer.



Fig. 3. (Color online) 3-axis Helmholtz coil system in side of non-magnetic laboratory for calibration of the magnetometer.

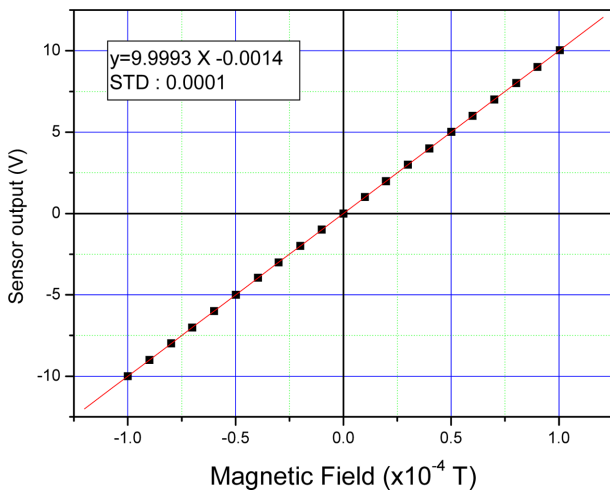


Fig. 4. (Color online) Linearity of the magnetometer measuring range of $\pm 100 \mu\text{T}$.

Fig. 2는 본 연구에서 제작한 마그네토미터의 사진으로 위쪽 PCB는 아날로그 신호처리 기판이고 다른 한쪽 기판은 전

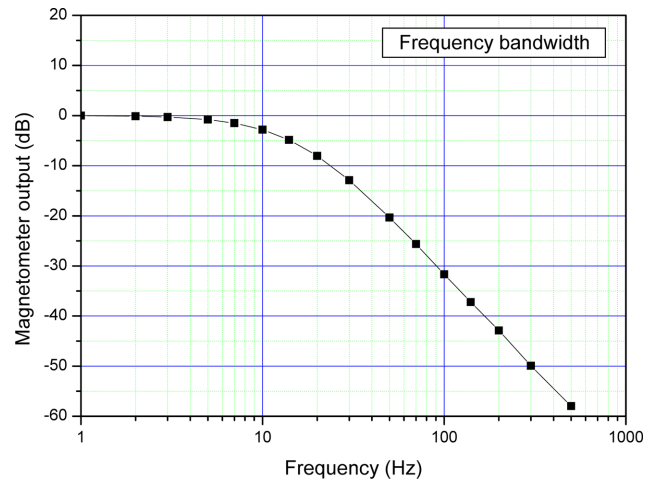


Fig. 6. (Color online) Frequency response of the magnetometer.

원 및 디지털 연산을 하는 PCB기판이다.

III. Flux-gate 마그네토 미터의 특성 측정

제작된 flux-gate 마그네토미터의 특성 측정은 Fig. 3과 같은 비자성 실험실에 설치된 3-축의 Helmholtz 코일을 사용하였다[5]. Fig. 4는 제작된 마그네토 미터의 선형도로 자기장 측정범위가 $\pm 0.1 \text{ mT}$ 범위에서 선형도가 10^{-4} 이하였다. 센서의 측정 주파수 대역폭을 측정하기 위한 장치는 Fig. 5와 같이 직경이 30 cm 정도인 소형 Helmholtz 코일을 사용하였으며, 그 측정결과는 Fig. 6과 같이 10 Hz에서 -3 dB이었다. 또한 센서의 noise 측정은 자기장 차폐율이 100 dB 이상인 원통형 자기장차폐장치안에 마그네토미터를 넣고 마그네토미터의 출력을 LabVIEW의 FFT분석 소프트웨어를 사용하여 측정하였다. Fig. 7은 제작된 마그네토미터의 noise 스펙트럼으로 1 Hz에서 30 pT 정도였다. 마그네토 미터의 Perming 효과측정은 코일상수가 0.02 T/A인 솔레노이드 안 중앙에 마그



Fig. 5. (Color online) 3-axis Helmholtz coil system for the frequency bandwidth measurement.

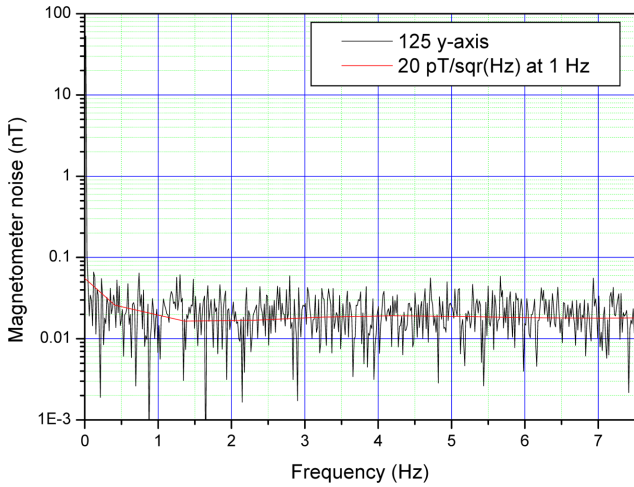
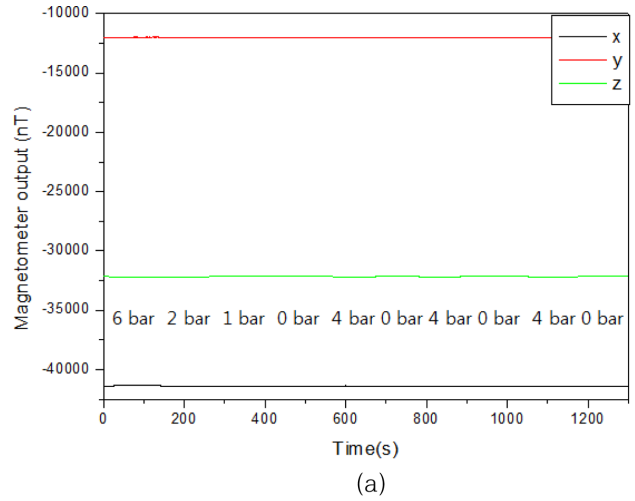
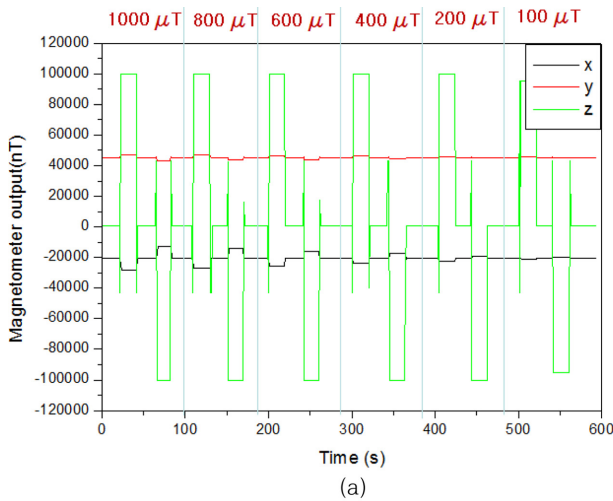


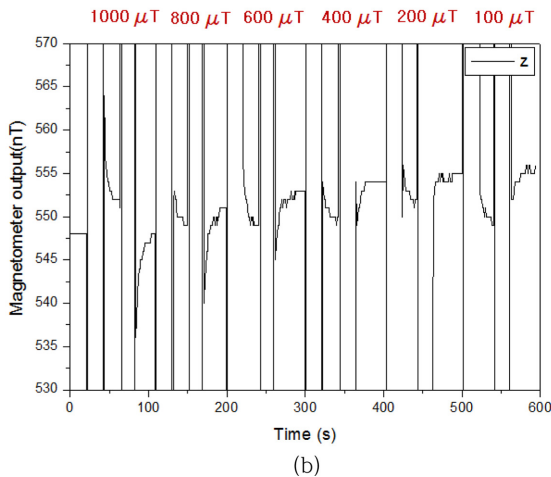
Fig. 7. (Color online) Noise spectrum of the magnetometer.



(a)



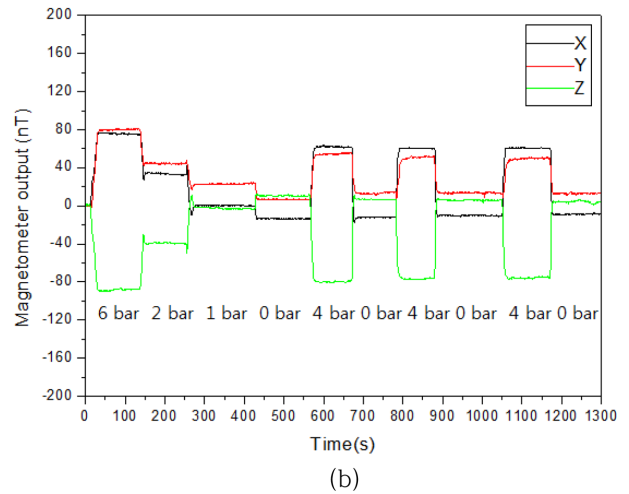
(a)



(b)

Fig. 8. (Color online) Change of magnetometer output under different magnetic field (a), and enlarged in center to observe perming effect.

네트미터를 넣은 후 자기장을 $\pm 1000 \mu\text{T}$, $\pm 800 \mu\text{T}$, $\pm 600 \mu\text{T}$, $\pm 400 \mu\text{T}$, $\pm 200 \mu\text{T}$ 및 $\pm 100 \mu\text{T}$ 씩 변화를 주면서 마그네



(b)

Fig. 9. (Color online) Change of the magnetometer output under different water pressure.

토미터의 출력 변화를 관찰한 결과가 Fig. 8이다. Fig. 8(a)에서 보면 슬레노이드 축 방향(마그네토미터의 z-축 방향)으로 $\pm 1 \text{ mT}$ 의 자기장을 인가하였기 때문에 z-축 방향의 마그네토미터 출력이 포화가 되게 나오고 있다. 그러나 x-축 및 y-축의 출력이 0이 아니고 일부 값으로 나오는데 이는 마그네토미터의 센서축이 서로 직교하지 않아서 발생한 문제이다. Perming 효과를 보기 위하여 출력의 0 자기장부분을 확대하여 본 것이 Fig. 8(b)이다. Fig. 8(b)에서 보면 외부자기장이 $\pm 1 \text{ mT}$ 변화할 때 마그네토미터 출력의 hysteresis 즉 perming 효과는 $\pm 2 \text{ nT}$ 이하였다. 마그네토미터의 수밀 특성을 측정하기 위하여 스테인레스강으로 된 챔버를 제작하고, 챔버에 물을 채운 후 마그네토미터를 넣고 챔버를 밀봉한 뒤 공기압축기의 압력을 조절하면서 센서의 출력을 측정한 결과가 Fig. 9이다. Fig. 9(a)에서 보면 마그네토미터의 출력이 실험실 환경자가장 크기에서는 변화가 없어 보이지만, 기존의 환경자기장 값을 빼고 변화량만 본 것이 Fig. 9(b)로 압력변화에 의

하여 마그네토미터의 출력 값이 4 bar의 압력 변화에 60 nT 정도의 변화가 일어나는 것으로 관측되었다. 이는 마그네토미터의 알루미늄 하우징이 압력에 의하여 변형이 되어 마그네토미터의 센서 코어부분과의 거리변화에 의하여 발생된 것으로 추정된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 합정에 의한 자기장의 변화를 측정하고, 또한 합정을 자기소거시키는 과정에서 합정에 의한 자기장을 측정하기 위한 3-축의 디지털 flux-gate 마그네토미터를 설계·제작하였다. 마그네토 미터의 원리는 피드백 형으로 제작하였으며, 코어는 Co계 비정질리본 Metglass®2714를 폭이 3 mm 되게 슬리팅 한후 350 °C에서 1시간 열처리를 하여 사용하였다. 마그네토미터의 설계에서 특별히 고려한 사항은 자기장 측정지점과 자기장 데이터를 수집하는 장치 사이의 거리가 수 백미터로 멀기 때문에 입력전압의 변동이 커도 동작이 되게 전압 범위가 16~36 V까지 가능한 DC/DC 변환기를 사용하였

고, 데이터의 전송은 자기장 측정값을 디지털로 변환 시킨 후 RS422 통신으로 전송하게 하였다. 또한 합정을 자기소거 하는 과정에서 발생하는 ±1 mT 자기장하에서도 0점의 변화 즉 perming 효과를 줄이기 위하여 피측정자기장의 보상은 ±1 mT, 측정범위는 ±0.1 mT가 되게 제작을 하였으며, perming 효과가 ±2 nT 정도였다. 또한 수심 30 m에서도 동작되어야 하는 조건을 고려하여 6기압 하에서 센서가 수밀이 되고 정상 작동이 되는 것을 확인 하였다. 마그네토미터의 일 반특성으로는 선형도가 측정범위 ±0.1 mT에서 0.01 % 이상 이였고 센서의 노이즈는 1 Hz에서 30 pT/√Hz이었다.

References

- [1] H. Aschenbrenner, Hoch Frequenztechnik und Electroacustics **44**, 2 (1934).
- [2] D. I. Gordon, IEEE Trans. Magn. **8**, 48 (1972).
- [3] W. F. Stuart, Rep. Prog. Phys. **35**, 803 (1972).
- [4] D. Son, J. Korean Magn. Soc. **22**, 45 (2012).